doi:10.13866/j.azr.2019.03.02

短期增温下青藏高原多年冻土区植物生长季土壤水分的动态变化①

李艳萍[1]， 史利江[2]， 徐满厚[1]， 李文刚[3]

（1. 太原师范学院地理科学学院，山西 晋中 030619； 2. 山西财经大学资源环境学院，山西 太原 030006；
3. 山西省农业科学院农业资源与经济研究所，山西 太原 030006）

摘 要： 以青藏高原腹地典型高寒草甸植被类型为研究对象，采用红外灯加热的方法模拟全球增温，并利用水分探头，于2012年植物生长季（5—9月）获取0～100 cm不同土层深度土壤水分含量数据，并分析其对增温的响应。结果表明：① 短期增温对高寒草甸土壤水分含量有提高作用，但增幅并不显著（$P>0.05$），平均提高2.85%。② 土壤水分含量随土层深度的增加呈现先减少后增加的趋势，在10～20 cm土层深度处降为最低值13.8%，在60～100 cm土层深度附近达到了20.57%的最高值；对照组5个月10～20 cm土层深度的土壤水分含量显著低于其他土层，而增温组0～20 cm土层深度的土壤含水量显著低于其他土层深度，表明增温对表层（0～10 cm）的土壤含水量影响较大，对深层土壤含水量的影响则较小，而且短期增温不会对土壤水分的垂直分布趋势产生影响。③ 土壤水分含量随时间的变化，在5—8月呈上升趋势，表明在青藏高原北麓河地区植物生长季，8月是其土壤水分含量最充足的月份，到了9月土壤中含水量开始降低，但5个土层深度降幅均不明显；增温组土壤水分含量随时间的变化趋势与对照组基本一致。

关键词： 土壤水分；高寒草甸；模拟增温；植物生长季；多年冻土；青藏高原

大量数据监测和模拟研究表明：随着20世纪全球温室效应范围的不断扩大，全球表面的平均温度在过去一个世纪平均上升了0.6 ℃[1]。IPCC第五次评估报告也指出，预计到21世纪末全球地表气温将在20世纪初的基础上升高0.3～4.8 ℃[2]。高纬度和高海拔地区的增温幅度更大，1981—2010年青藏高原地区整体呈升温趋势，平均升温率为0.40 ℃·$(10a)^{-1}$[3]。

青藏高原因其独特的地理位置和特殊的气候生态系统特征，被认为是气候变化的敏感区[4]。该地区不仅气温升高，其浅层土壤温度也一直呈上升趋势，从而导致冻土退化加剧和活动层加深，严重影响到多年冻土区的地表能量平衡、植物生长等过程[5-8]。土壤水分作为连接土壤—植被—大气的一个关键因素，也是对气候变化比较敏感的环境因子之一。在高寒地区，土壤水分的变化主要受气温、降水、植被、冻土的冻融循环，土壤质地等因素的影响[9]，其中温度是土壤水分运移的主要驱动力，增温不仅会改变土壤的水力参数，而且土壤水分也会借助温度梯度而产生运移；降水是该地区土壤水分的主要来源，降水的季节变化将直接影响土壤水分的时间分布格局；此外，温度和降水会共同影响植物的生长发育程度[10]，而根系分布将影响土壤水分的空间分布；冻土的冻融循环也会严重影响土壤的水文过程；土壤质地影响土壤的持水、保水性，进而对水分在土壤中的运移产生影响[11-12]。不同因素在不同土层深度对土壤水分的影响程度存在差异[13]，而各因子对于土壤水分的具体影响机制还需进一步研究。

为了保护青藏高原地区的生态环境，充分揭示全球变暖背景下青藏高原高寒草甸土壤水分的响应机制，近年来越来越多的学者展开了青藏高原土壤温湿状况的研究，主要集中在以下几个方面：① 以土壤自身的温度和水分为研究对象，对比土壤温湿

① 收稿日期：2018-07-30； 修订日期：2018-11-06
基金项目：国家自然科学基金青年科学基金项目（41501219）；山西省自然科学基金面上项目（2016011085）和山西省高校人文社科重点研究基地项目（2014341）共同资助
作者简介：李艳萍（1991-），女，在读硕士研究生，研究方向为土壤固碳和土壤水分. E-mail：1842303330@qq.com
通讯作者：史利江. E-mail：slj19972@126.com

状况在土壤剖面不同土层深度的分布状况及其随时间尺度的变化状况[14-16]；② 青藏高原高寒草甸生态系统土壤水分时空变异性及其影响因素研究[12,17-18]；③ 把气温作为影响土壤温湿状况的一个重要影响因素，探讨气温升高对青藏高原土壤水热变化的影响[19]。总体来看，增温对土壤水分影响的研究结果之间仍存在极大的差异性和不确定性，对其机理的研究尚不完善。此外，大多数研究以表土层为研究对象，而关于增温对深层土壤水分的影响研究还很欠缺。在增温处理上，大多选用开顶式气室法(OTC)增温，以草甸植被类型作为研究对象，利用红外线增温装置模拟全球气候变暖，分析模拟增温对高寒草甸土壤水分的影响，这不仅对理解气候变化背景下的高寒生态系统土壤水热过程和三江源区水循环过程具有重要的意义，而且对高寒地区水源涵养和生态环境保护也具有重要意义。

1 数据与方法

1.1 研究区域概况

研究区位于青藏高原研究基地北麓河试验站(34°49′33.98″~34°49′36.58″N、92°55′57.19″~92°56′06.32″E)，隶属于三江源地区，地处冲、洪积高平原，地势较为平坦，地形稍有起伏，海拔高度在4 620~4 640 m。该地年均气温 -5.9 °C，年均降水量267.6 mm，年均潜在蒸发量1 316.9 mm；年内冻结期为9月至翌年4月，长达7~8个月。试验区地处青藏高原多年冻土区内，多年冻土活动层厚度一般可达2~3 m(最大厚度为3.4 m，最小厚度为1.7 m)；地表植被发育良好，属高寒草甸类型，土壤为高山草甸土，以沙土居多，沙粒含量占90%以上，剖面发育具有薄层性和粗骨性特点；表层具有5~15 cm厚草皮层，土层一般仅为4~6 cm[20]。

1.2 样地设置

红外线辐射加热装置能比较真实地模拟全球变化的条件，其加热的原理是通过悬挂在样地上方的灯管散发红外辐射，从而增加恒定量的向下红外辐射能量。此增温装置能广泛应用于草地生态系统。该装置灯管非破坏性地传递能量，对土壤及植被无物理干扰，且不改变微环境。实验样地选在植被分布均匀，地势较为平坦，没有经过放牧、鼠兔啃食等干扰；增温实验使用的是红外线辐射器，用来模拟真实的全球气候变暖环境中增强的向下红外线辐射。对照样方设置：该样方内不进行增温处理，保持植被原始状态。增温样方设置：从2011年11月开始增温，增温装置采用美国Kalgolo Electronics公司生产的红外加热灯，灯体长165 cm、宽15 cm的三棱形，灯管长150 cm、直径0.8 cm的圆柱体，将其架设在样方正上方距地面1.5 m高度处，增温幅度为150 W·m^{-2}，使地面温度约增加3 ℃，全年无间断的持续增温，夜间和白天的增温幅度不变[20]。

1.3 土壤水分测定

青藏高原植物生长季为5—9月，此次实验的测定时间为5—9月。样地设置方案：每组设置5个重复，实验共有10个样方，每个样方面积为2 m×2 m，相邻样方间隔4~5 m，样地设置情况如图1。土壤水分测定方法：基于频域反射原理的Envior SMART型水分探头测定，该探头采用的结构是一杆多节的插管式设计，其于2010年完成布设，在2012年每隔10 min观测1次，共分10 cm、20 cm、40 cm、60 cm、100 cm等5个土层深度测定土壤水分，计算时将10 min监测数据平均为天数据。在对土壤水分进行监测的同时，利用Model 109型温度探头测定土壤温度。本文仅研究增温对土壤水分的影响，故对土壤温度没有进行详细分析。为减弱强风对增温实验的影响，在所有样方的西和北两个方向各布设一块1.5 m高的铁质挡风板。之后，在所有样方的中心位置固定一个大小为27 cm ×27 cm的样方框，用于测定该样地植被的物种多样性。所有实验样方外围都用铁丝网围拦，以防破坏[21]。

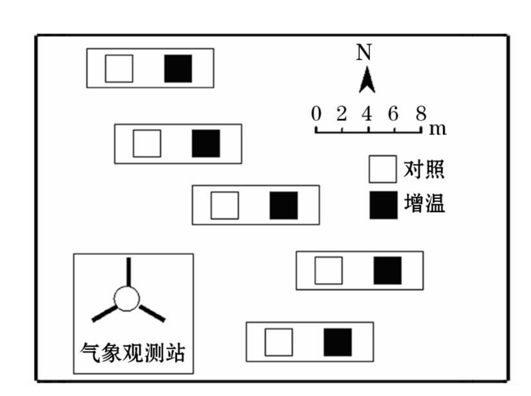


图1 增温实验样地分布示意图

Fig. 1 Distribution of warming experimental plots

2 结果与分析

2.1 各月份土壤水分在不同实验处理下的变化

各月整个土壤剖面的平均含水量分别在增温、

对照两种实验处理下的变化情况如表 1 所示:所有月份增温处理下的土壤水分含量均高于对照组。从5—9 月土壤含水量的平均值来看,对照组的土壤水分含量平均值为 17.15%,在增温处理下土壤水分含量有所增加,平均值为 20%,两者相差 2.85%。进行单因素方差分析发现:在 5 个月,增温处理下的土壤水分与对照组的土壤水分含量相比差异性均不显著($P>0.05$),其中土壤水分含量受增温影响最大的为 6 月,其增温和对照实验下的土壤水分含量相差 3.44%,但是仍未达到显著性水平;6 月研究区开始进入雨季,因此降水对土壤水分的补给量加大;在加热的情况下,样地的土壤温度不同程度的升高,在一定程度上促进了冻土活动层的融化;此外,增温对土壤含水量、降水的入渗量和水分运移也产生了一定的影响。总体趋势是温度升高,水分运动加快;随着温度的增加,土壤导水率逐渐增大;相同时段内累积入渗随温度升高而增大[22]。

表 1　2012 年植物生长季(5—9 月)不同实验处理下土壤水分含量变化显著性分析

Tab.1　Significance analysis of soil moisture content change under different treatments in growing season from may to september in 2012

月份	0~100 cm 土层对照组平均含水量/%	0~100 cm 土层增温组平均含水量/%	增温组与对照组差值/%	显著性
5	11.14±0.38	13.97±0.50	2.83	0.253
6	14.37±3.42	17.81±0.39	3.44	0.164
7	16.55±2.00	19.55±0.16	3.00	0.433
8	24.44±4.50	26.11±2.39	1.67	0.637
9	19.25±0.46	22.57±1.54	3.32	0.407

2.2　不同深度的土壤水分在不同实验处理下的差异

高寒草甸植物生长季,各个土层深度土壤水分含量在对照和增温两种实验处理下的平均状况。由表 2 可知:增温使 0~10 cm 土层深度土壤水分含量出现下降,由于增温加快了高寒草甸浅层土壤水分的蒸发和植被的蒸腾速率,其他所有土层深度土壤含水量均是增温组大于对照组,这表明短期增温普遍提高了各土层土壤的含水量,只是在不同土层深度,增温对其土壤含水量的影响程度不同,其中,受增温影响最大的为 40~60 m 土层深度,该土层对照和增温处理下的土壤水分含量相差 6.53%。其原因一方面是由于研究区 40~60 cm 土层深度土壤粒径较小,几乎没有粗砂粒,因此该层土壤持水、保水性较好,而且该土层受冻融循环过程的影响较小。另外,从样地布设的土壤温度探头监测的数据表明,红外辐射器对 0~40 cm 土层深度的土壤温度影响最大,而对更深层的土壤温度影响较小,促使 0~40 cm 深度土壤水分大部分下移;在 60~100 cm 土层深度处的土壤水分含量增幅次之,增加了 4.66%;增温对 10~20 cm 深度处的土壤水分含量影响最小,其原因一方面是由于高寒草甸植被根系较浅,主要利用表层土壤水分,因此该层土壤水分含量本身就最低;其次由于研究区土壤经过冻融作用,表层土壤的结构和质地改变,粗粒程度增大,故该土层的持水性差。另外,增温促进了表土层水分蒸发和下移。总体来看,多种因素综合作用,导致 10~20 cm 的土壤水分含量受增温的影响最小。对增温、对照两个实验处理下不同土层深度的土壤水分含量数据进行单因素方差分析发现:在不同土层深度,增温处理下的土壤水分含量与对照组相比,差异性均未达到显著性水平($P>0.05$)。

表 2　0~100 cm 不同土层不同实验处理下土壤水分变化显著性分析

Tab.2　Significance analysis of soil moisture content at depths of 0–100 cm under different treatments

土层深度/cm	对照组含水量/%	增温组含水量/%	增温组与对照组差值/%	显著性
0~10	17.18±0.35	15.64±0.36	−1.54	0.422
10~20	13.80±2.07	14.80±0.36	1	0.957
20~40	16.19±0.47	20.68±2.17	4.49	0.145
40~60	17.12±1.80	23.65±0.47	6.53	0.099
60~100	20.57±6.06	25.23±1.62	4.66	0.486

2.3　不同实验处理下的土壤水分随土层深度的变化

由图 2 可知:对于对照组而言,除了 5 月的土壤水分含量是随土层深度的增加而逐渐减少,其他各个月份土壤水分的垂直分布趋势均是先减少后增加,在 20 cm 土层深度处达到最低值,其原因一方面是由于表层土壤受到蒸散发作用的影响,其次由于研究区植被根系分布较浅,主要吸收表层 0~20 cm 的土壤水分。随着土层深度的增加,土壤水分含量受温度、植被等因素的影响逐渐减小,而且研究区从 6 月开始进入雨季,降水有助于深层土壤水分的补给,且深层土壤较表层保水、持水性好,因此,在 60~100 cm 深度的土壤水分含量达到最大值。

为了比较土壤水分含量在各土层深度的变化情况,分别对相邻土层的水分含量进行总体单因素方差分析,结果显示:在植物生长季的5个月中,只有

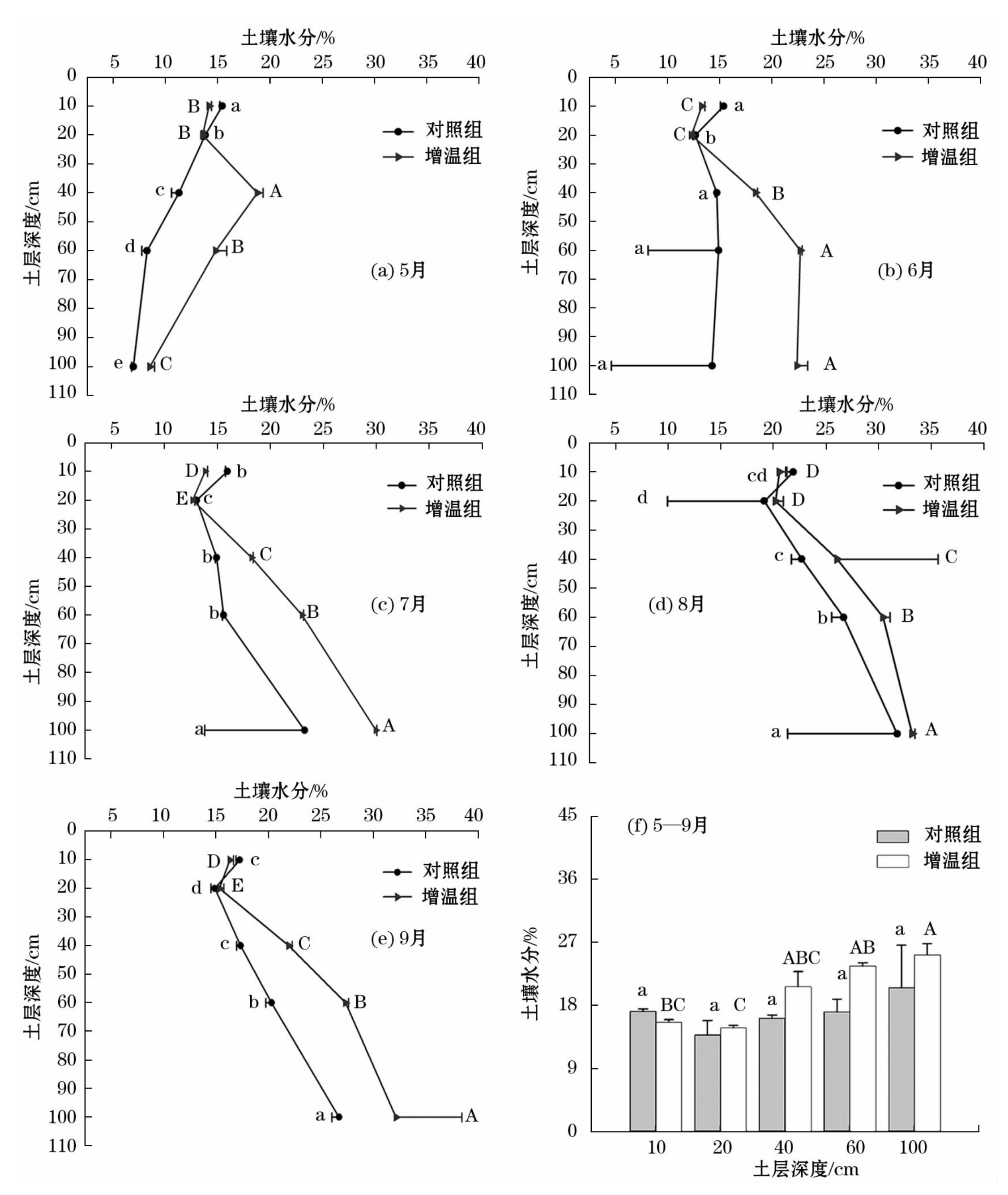


图 2　各月不同处理下的土壤水分含量的垂直分布

Fig. 2　Vertical distribution of soil moisture content under different treatments in different months

5 月各个土层深度的土壤含水量之间的差异性均达到了显著性水平($P<0.05$),其他月份只有 10 ~ 20 cm 土层的土壤水分含量与其他土层差异性达到了显著性水平($P<0.05$),即 10 ~ 20 cm 土层的土壤含水量显著低于其他土层。增温组 5 个月 0 ~ 20 cm 土层的土壤含水量均显著低于其他土层,这表明增温会导致表土层 0 ~ 10 cm 的土壤水分含量显著下降,而对深层土壤含水量的影响比较小。

2.4　不同实验处理下的土壤水分随时间的变化

由图 3 可知:对于对照组而言,无论是表层还是深层土壤,其含水量随植物生长季的 5 个月均表现出先增加后减少的趋势。从 5 月开始到 8 月土壤水分含量一直增加,其中 5 月是青藏高原北麓河地区土壤水分含量最低的月份,8 月土壤中的水分最充足,且 8 月的水分含量是 5 月的 2.19 倍。这个趋势与研究区降水量随时间的变化格局一致,该地区降水集中分布在 6—8 月,约占全年降水总量的 80% 以上。由此表明:对于青藏高原北麓河地区,降水是影响其土壤水分空间分布格局的主要因子。到了9月土壤水分含量开始降低,但降幅均不显著

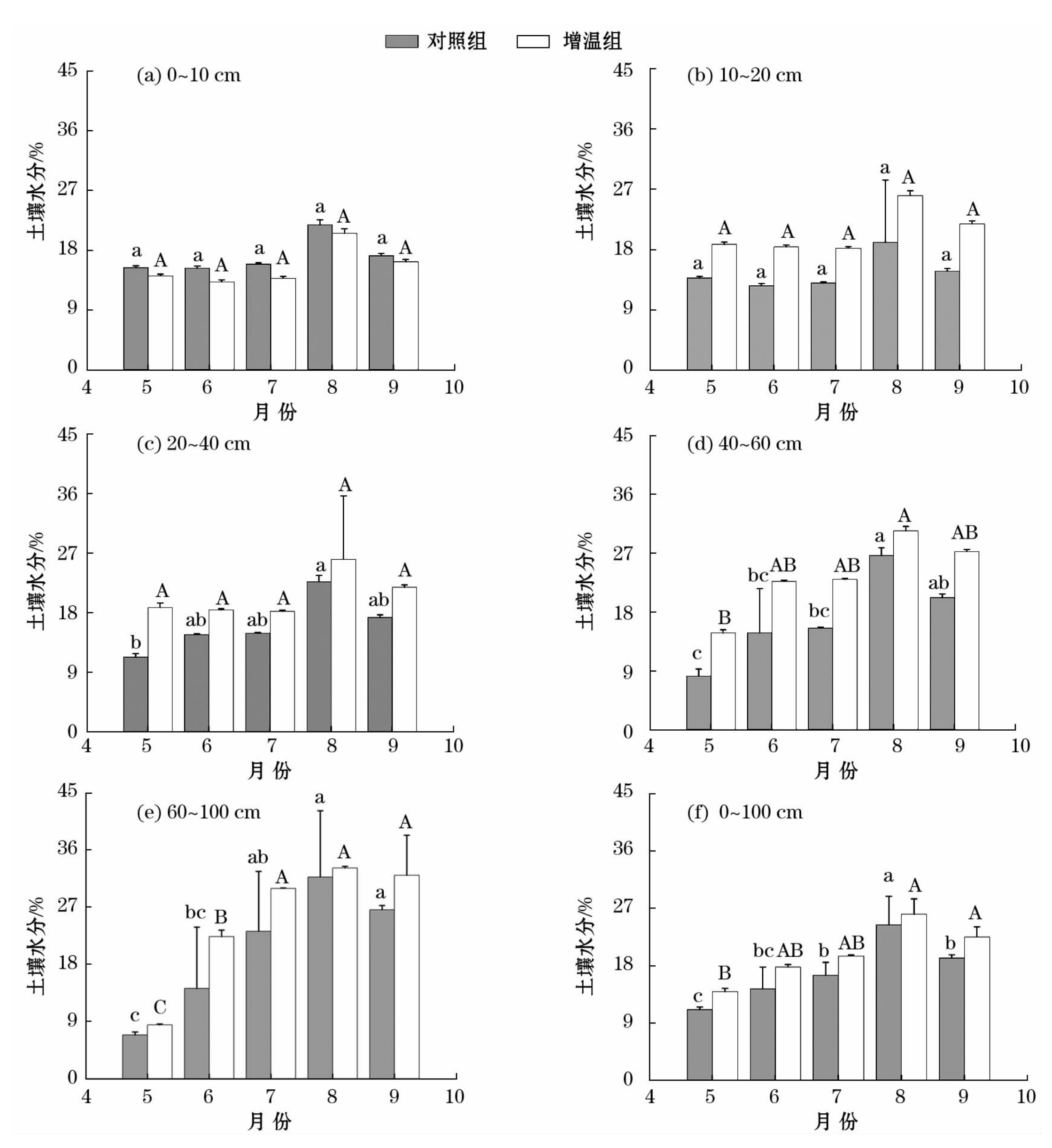


图 3 各土层深度土壤水分含量随时间的变化趋势

Fig. 3 Variation trend of soil moisture content at different depths with the time

($P>0.05$);增温组土壤水分含量随时间的变化趋势与对照组基本一致,说明短期增温并没有改变土壤含水量在月际间的变化趋势。此外,表层土壤(0~20 cm)在5—7月,水分含量随时间而递减;而深层(40~100 cm)土壤水分含量在5—7月随时间则呈现增加趋势,这是由于实验区从5月底到6月初表层土壤开始融化,故5月表层土壤水分含量达到最大,由表层到深层,随着时间的推移,表层土壤水分含量逐渐减小,深层土壤水分含量逐渐增加,表明土壤水分随时间不断迁移。

为了比较各月土壤水分含量之间变化的显著性情况,对各土层5—9月土壤水分含量进行总体单因素方差分析:对于对照组而言,7—9月,相邻月份之间的土壤水分含量差异性显著($P<0.05$)。5—7月,相邻月份之间的土壤水分含量分别相差3.23%和2.18%,均未达到显著性水平($P>0.05$)。对于增温组而言,相邻月份土壤水分含量的差异性均未达到显著性水平($P>0.05$),但短期增温对土壤水分含量的月际变化还是产生了一定程度的影响。

3 结论与讨论

3.1 结论

(1)各个月份增温处理下的土壤水分含量均高于不增温对照组,且平均高出2.85%。在这5个月份,对土壤进行不同实验处理,发现增温处理下的土

壤水分与对照组的土壤水分含量相比,差异性均未达到显著性水平,表明尽管短期增温对高寒草甸土壤水分含量的影响不大,但增温使土壤水分含量普遍提高了,且对于不同月份,土壤水分含量的增幅存在差异。

(2) 土壤水分含量随土层深度的增加呈现出先减少后增加的趋势,在 10 ~ 20 cm 土层降为最低值 13.8%,在 60 ~ 100 cm 土层附近达到最高 20.57%。对照组,植物生长季的 5 个月中,只有 5 月各个土层的土壤含水量之间差异性均达到了显著性水平,其他月份只有 10 ~ 20 cm 土层的土壤水分含量显著低于其他土层。增温组 5 个月 0 ~ 20 cm 土层的土壤含水量显著低于其他土层。这表明增温对表层 0 ~ 10 cm 的土壤含水量影响较大,对深层土壤含水量的影响则比较小,而且短期增温不会对土壤水分的垂直分布趋势产生影响。

(3) 无论是对照组还是增温组,其表层和深层土壤含水量随时间均表现出先增加后减少的趋势,5 月各土层中的土壤含水量均为最低值,8 月最高;增温组土壤水分含量随时间的变化趋势与对照组基本一致。对于对照组而言,7—9 月,相邻月份之间的土壤水分含量差异性显著;5—7 月,相邻月份之间的土壤水分含量差异性未达到显著性水平。对于增温组而言,相邻月份土壤水分含量之间的差异均不显著。

3.2 讨论

3.2.1 增温对土壤水分的影响 增温过程主要通过影响土壤温度和植物生长来间接影响土壤含水量[23]。增温幅度的差异本身会导致对土壤水分影响的差异,即使是增温幅度相同,其对植物生长季不同月份以及不同土层深度的土壤温湿度影响也不同[24]。关于增温对表层以及深层土壤含水量的影响,不同学者得到的结论不尽相同。一些研究表明:增温加强了表层土壤的蒸散发作用和植物的蒸腾作用,从而使表层土壤水分含量降低[25-26],如陈有超等[1]的研究表明:夏季藏北高寒草原地表 0 ~ 10 cm 土壤水为液态水,OTC 增温令地表水分蒸发量加大,导致增温显著降低了土壤水分含量;姜炎彬等[25]利用 OTC 对藏北高寒草甸 0 ~ 40 cm 深度土壤增温,结果显示:增温直接导致植物的蒸腾作用和土壤的蒸散作用增强,从而使土壤湿度降低;Wan 等[26]利用红外加热装置对草地生态系统进行增温的研究结果也表明,增温过程引起植物和土壤蒸发散的增加,进而导致土壤含水量的降低。也有一些研究表明:增温过程中浅层土壤已经融化而深层土壤仍处于冻结状态,冻融锋面起到阻隔水分下渗的作用。此外,植被根系和腐殖质层具备较强的持水作用,从而使表层土壤水分含量增加[27-29],如刘光生等[27]的研究显示,与对照组样地相比,OTC 内呈现出更高的浅层土壤含水量,这与 OTC 内较高的地上生物量和沼泽草甸的弱排水能力有关;王根绪等[28]对黄河源区的高寒草甸植被覆盖变化对土壤水分循环的研究也发现,当植被保持其原有建群和较高覆盖度时,土壤上层具有较高持水能力;Klein 等[29]也发现,增温对土壤水分有提高作用,但并不显著。在本研究中,增温对土壤水分含量的影响在不同月份较一致,而在不同土层深度有差异。增温使表层(0 ~ 20 cm)土壤水分含量降低,结合本实验空气水汽压数据分析发现,这些减少的土壤水分较少蒸发到空气中,而是大部分下移到土壤深层[21];其他土层深度均表现为增温组大于对照组,但是深层土壤水分含量即使增加,但增幅并不显著。

关于增温对深层土壤水分含量影响的研究结果之间也存在一定的差异性。刘光生等[27]研究认为,在多年冻土区北麓河流域,采用 OTC 增温会使融化过程期和完全融化期的土壤含水量随土层深度增加而降低,并且增温幅度越大,降低幅度越大,其原因一方面是由于短期增温浅层土壤已经开始融化,而深层土壤仍处于冻结状态;另一方面是由于受到降水入渗和冻融锋面迁移导致的水分向浅层土壤和活动层底部运移的影响。而本研究发现,增温使深层土壤水分含量均不同程度的提高。从目前来看,在青藏高原关于增温对土壤水分影响的相关研究仍主要集中在表层 0 ~ 20 cm,而深层土壤水分对增温响应效果与机制的相关研究还很少,仍待进一步完善。

3.2.2 高寒草甸土壤水分的时空变异性 土壤水分在垂直剖面上的分布趋势与影响各土层土壤水分空间变异性的因素是密切相关的。高泽永等[30]在长江源地区的研究发现,高寒草甸土壤水分在 50 cm 深度左右存在一个低含水层,20 cm 土层深度为高含水层。李元寿等[31]在北麓河地区的研究表明,土壤水分含量平均值随土层深度的增加而增加;本研究结果却表明,10 ~ 20 cm 土层深度为土壤水分的一个低值区,20 ~ 100 cm 土层的土壤含水量随土层深度的增加呈递增趋势,导致研究结果存在差异性的原因是表层土壤水分主要受植被根系分布、生

长状况和气候等空间自相关因素的影响,而深层土壤水分则主要受地下水及其冻土上限的融化等随机性因素的影响[12,31]。

土壤水分含量随时间的波动特征主要受降水的影响,青藏高原地区5月之后,植物开始进入生长季,同时受到夏季集中降水的影响,表层土壤含水量开始逐渐增加;9月之后植被开始枯黄,降水逐渐减少,表层土壤含水量也相应减少[10]。很多研究结果均表明,土壤水分随时间的变化与该区域的降水状况是一致的,如刘强等[18]基于双通道土壤水分反演算法和AMSR-E卫星数据反演出的青藏高原土壤水分分布格局,从5月开始到8月,土壤水分的高值区域开始沿着高原东南方向内部扩展,随着雨季的全面来临,土壤水分值高的区域分布范围逐渐扩大,土壤水分也开始大范围上升;由于8月下旬季风开始撤退,到9月中旬季风退出高原,部分地区开始回冻,所以到9月土壤水分有所下降。李元寿等[31]利用FDR水分探头监测到北麓河地区表层土壤水分含量从5月底开始表现出先增大后趋于平缓下降的趋势。本研究表明,无论是表层还是深层土壤,其水分含量随时间的变化趋势均表现出先增加后减少的趋势,8月份青藏高原北麓河地区的土壤水分含量达到最大,而且随着时间的推移,表层土壤水分含量逐渐减小,深层土壤水分含量逐渐增加,由此表明土壤水分随时间是不断向下迁移的。由于本研究数据具有一定的局限性,因此,在今后的研究中,将不断进一步充实和完善该方面的数据,结合现代技术手段进行更加深入的研究。

参考文献(References):

〔1〕 陈有超,鲁旭阳,李卫朋,等.藏北典型高寒草原土壤微气候对增温的响应〔J〕.山地学报,2014,32(4):401-406.〔Chen Youchao,Lu Xuyang,Li Weipeng,et al. Response of soil microclimate to warming in alpine steppe Northern Tibetan Plateau〔J〕. Mountain Research,2014,32(4):401-406.〕

〔2〕 IPCC第五次评估报告解读.中国气象局,2014. http://www.cma.gov.cn/2011xzt/2014zt/20141103/2014110310/201411/t20141113_266684.html

〔3〕 王朋岭,唐国利,曹丽娟,等.1981—2010年青藏高原地区气温变化与高程及纬度的关系〔J〕.气候变化研究进展,2012,8(5):313-319.〔Wang Pengling,Tang Guoli,Cao Lijuan,et al. Surface air temperature variability and its relationship with altitude & latitude over the Tibetan Plateau in 1981-2010〔J〕. Climate Change Research,2012,8(5):313-319.〕

〔4〕 李娜,王根绪,杨燕,等.短期增温对青藏高原高寒草甸植物群落结构和生物量的影响〔J〕.生态学报,2011,31(4):895-905.〔Li Na,Wang Genxu,Yang Yan,et al. Short-term effects of temperature enhancement on community structure and biomass of alpine meadow in the Qinghai-Tibet Plateau〔J〕. Acta Ecologica Sinica,2011,31(4):895-905.〕

〔5〕 许茜,李奇,陈懂懂,等.近40 a三江源地区土地利用变化动态分析及预测〔J〕.干旱区研究,2018,35(3):695-704.〔Xu Qian,Li Qi,Chen Dongdong,et al. Land use change in the three-river headwaters in recent 40 years〔J〕. Arid Zone Research,2018,35(3):695-704.〕

〔6〕 张法伟,李红琴,李英年,等.青藏高原高寒草甸气温、降水和地上净初级生产力变化的周期特征〔J〕.应用生态学报,2009,20(3):525-530.〔Zhang Fawei,Li Hongqin,Li Yingnian,et al. Periodic fluctuation features of air temperature,precipitation,and above ground net primary production of alpine meadow ecosystem on Qinghai-Tibetan Plateau〔J〕. Chinese Journal of Applied Ecology,2009,20(3):525-530.〕

〔7〕 周华坤,赵新全,赵亮,等.青藏高原高寒草甸生态系统的恢复能力〔J〕.生态学杂志,2008,27(5):697-704.〔Zhou Huakun,Zhao Xinquan,Zhao Liang,et al. Restoration capability of alpine meadow ecosystem on Qinghai-Tibetan Plateau〔J〕. Chinese Journal of Ecology,2008,27(5):697-704.〕

〔8〕 范继辉,鲁旭阳,王小丹.藏北高寒草地土壤冻融循环过程及水热分布特征〔J〕.山地学报,2014,32(4):385-392.〔Fan Jihui,Lu Xuyang,Wang Xiaodan. The freezing-thawing processes and soil moisture-energy distribution in permafrost active layer,Northern Tibet〔J〕. Mountain Research,2014,32(4):385-392.〕

〔9〕 柴雯.高寒草甸覆盖变化下土壤水分动态变化研究〔D〕.兰州:兰州大学,2008.〔Chai Wen. Study on the Dynamic Change of Soil Moisture under Different Vegetation Coverage in Alpine Meadow〔D〕. Lanzhou:Lanzhou University,2008.〕

〔10〕 赵之重,赵凯,徐剑波,等.三江源地表反照率时空变化及其与气候因子的关系〔J〕.干旱区研究,2014,31(6):1 031-1 038.〔Zhao Zhizhong,Zhao Kai,Xu Jianbo,et al. Spatial-temporal changes of surface albedo and its relationship with climate factors in the source of three rivers region〔J〕. Arid Zone Research,2014,31(6):1 031-1 038.〕

〔11〕 焦永亮,李韧,赵林,等.多年冻土区活动层冻融状况及土壤水分运移特征〔J〕.冰川冻土,2014,36(2):237-247.〔Jiao Yongliang,Li Ren,Zhao Lin,et al. Processes of soil thawing-freezing and features of soil moisture migration in the permafrost active layer〔J〕. Journal of Glaciology and Geocryology,2014,36(2):237-247.〕

〔12〕 李元寿,王根绪,丁永建,等.青藏高原高寒草甸区土壤水分的空间异质性〔J〕.水科学进展,2008,19(1):61-67.〔Li Yuanshou,Wang Genxu,Ding Yongjian,et al. Spatial heterogeneity of soil moisture in alpine meadow area of the Qinghai-Xizang Plateau〔J〕. Advances in Water Science,2008,19(1):61-67.〕

〔13〕 王军德,王根绪,陈玲.高寒草甸土壤水分的影响因子及其空间变异研究〔J〕.冰川冻土,2006,28(3):428-433.〔Wang

Junde, Wang Genxu, Chen Ling. Impact factors to soil moisture of alpine meadow and their spatial heterogeneity [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2006, 28(3): 428 – 433.]

[14] 赵逸舟,马耀明,马伟强,等. 藏北高原土壤温湿变化特征分析[J]. 冰川冻土, 2007, 29(4): 578 – 583. [Zhao Yizhou, Ma Yaoming, Ma Weiqiang, et al. Variations of soil temperature and soil moisture in Northern Tibetan Plateau [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2007, 29(4): 578 – 583.]

[15] 万国宁,杨梅学,王学佳,等. 青藏高原中部 BJ 站土壤湿度不同时间尺度的变化[J]. 土壤通报, 2012, 43(2): 286 – 293. [Wan Guoning, Yang Meixue, Wang Xuejia, et al. Variations in soil moisture at different time scales of BJ site on the central Tibetan Plateau [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2012, 43(2): 286 – 293.]

[16] 王建明. 基于 ERS 散射计数据的青藏高原土壤水分估算方法研究[D]. 北京:中国科学院遥感应用研究所, 2005. [Wang Jianming. Study on Land Surface Soil Moisture Retrieval Method with ERS Wind Scatterometer over Tibetan Plateau [D]. Beijing: Institute of Remote Sensing Applications Chinese Academy of Sciences, 2005.]

[17] 朱绪超,邵明安,朱军涛,等. 高寒草甸生态系统表层土壤水分时间稳定性研究[J]. 农业机械学报, 2017, 48(8): 212 – 218. [Zhu Xuchao, Shao Mingan, Zhu Juntao, et al. Temporal stability of surface soil moisture in alpine meadow ecosystem on northern Tibetan Plateau [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(8): 212 – 218.]

[18] 刘强,杜今阳,施建成,等. 青藏高原表层土壤湿度遥感反演及其空间分布和多年变化趋势分析[J]. 中国科学:地球科学, 2013, 43(10): 1 677 – 1 690. [Liu Qiang, Du Jinyang, Shi Jiancheng, et al. Analysis of spatial distribution and multi-year trend of the remotely sensed soil moisture on the Tibetan Plateau [J]. Science China: Earth Sciences, 2013, 43(10): 1 677 – 1 690.]

[19] 王俊峰,吴青柏. 气温升高对青藏高原沼泽草甸浅层土壤水热变化的影响[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2010, 46(1): 33 – 39. [Wang Junfeng, Wu Qingbai. Impact of elevated temperature on the heat and water changes of the shallow soil layers in the swamp meadow areas of the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences Edition), 2010, 46(1): 33 – 39.]

[20] 徐满厚,薛娴. 青藏高原高寒草甸夏季植被特征及对模拟增温的短期响应[J]. 生态学报, 2013, 33(7): 2 071 – 2 083. [Xu Manhou, Xue Xian. A research on summer vegetation characteristics & short-time responses to experimental warming of alpine meadow in the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(7): 2 071 – 2 083.]

[21] 徐满厚,刘敏,翟大彤,等. 青藏高原高寒草甸生物量动态变化及与环境因子的关系——基于模拟增温实验[J]. 生态学报, 2016, 36(18): 5 759 – 5 767. [Xu Manhou, Liu Min, Zhai Datong, et al. Dynamic changes in biomass and its relationship with environmental factors in an alpine meadow on the Qinghai-Tibetan Plateau, based on simulated warming experiments [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(18): 5 759 – 5 767.]

[22] 韩雄,王珍,赵萌莉,等. 增温对短花针茅荒漠草原水分及其利用效率影响的研究[C]//中国草业发展论坛论文集. 北京:中国草学会, 2008. [Han Xiong, Wang Zhen, Zhao Mengli, et al. Study of simulated greenhouse effect on water and utilization efficiency in the *Stipa breviflora* Griseb [C]//Proceedings of Chinese Grassland Development Forum. Beijing: Chinese Grassland Society, 2008.]

[23] 王瑞. 模拟增温和降水变化对高寒草甸土壤和植被碳、氮的影响[D]. 兰州:甘肃农业大学, 2016. [Wang Rui. Effects of Warming and Precipitation Enhancement on Soil and Plant Carbon and Nitrogen of Alpine Meadow Ecosystem [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2016.]

[24] 钞然,张东,陈雅丽,等. 模拟增温增雨对典型草原土壤酶活性的影响[J]. 干旱区研究, 2018, 35(5): 695 – 704. [Chao Ran, Zhang Dong, Chen Yali, et al. Effects of simulated temperature and precipitation increase on soil enzyme activity in typical steppe [J]. Arid Zone Research, 2018, 35(5): 695 – 704.]

[25] 姜炎彬,范苗,张扬建. 短期增温对藏北高寒草甸植物群落特征的影响[J]. 生态学杂志, 2017, 36(3): 616 – 622. [Jiang Yanbin, Fan Miao, Zhang Yangjian. Effect of short-term warming on plant community features of alpine meadow in Northern Tibet [J]. Chinese Journal of Ecology, 2017, 36(3): 616 – 622.]

[26] Wan S Q, Luo Y Q, Wallace L L. Changes in microclimate induced by experimental warming and clipping in tall grass prairie [J]. Global Change Biology, 2002, 8(8): 754 – 768.

[27] 刘光生,王根绪,孙向阳,等. 长江源区沼泽草甸多年冻土活动层土壤水分对模拟增温的响应[J]. 冰川冻土, 2015, 37(3): 668 – 675. [Liu Guangsheng, Wang Genxu, Sun Xiangyang, et al. The response of soil moisture in swamp meadow in the source regions of the Yangtze River to artificially warming [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2015, 37(3): 668 – 675.]

[28] 王根绪,沈永平,钱鞠,等. 高寒草地植被覆盖变化对土壤水分循环影响研究[J]. 冰川冻土, 2003, 25(6): 653 – 659. [Wang Genxu, Shen Yongping, Qian Ju, et al. Study on the influence of vegetation change on soil moisture cycle in alpine meadow [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2003, 25(6): 653 – 659.]

[29] Klein J A, Harte J, Zhao X Q. Dynamic and complex microclimate responses to warming and grazing manipulations [J]. Global Change Biology, 2005, 11(9): 1 440 – 1 451.

[30] 高泽永,王一博,刘国华,等. 多年冻土区活动层土壤水分对不同高寒生态系统的响应[J]. 冰川冻土, 2014, 36(4): 1 002 – 1 010. [Gao Zeyong, Wang Yibo, Liu Guohua, et al. Response of soil moisture within the permafrost active layer to different alpine ecosystems [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(4): 1 002 – 1 010.]

[31] 李元寿,王根绪,程玉菲,等. FDR 在高寒草地土壤水分测量中的标定及其应用[J]. 干旱区地理, 2006, 29(4): 543 – 547. [Li

Yuanshou, Wang Genxu, Cheng Yufei, et al. Field calibration of FDR probe and its application in measuring soil water content in alpine meadow〔J〕. Arid Land Geography, 2006, 29(4): 543 - 547.〕

Effect of Short-Term Warming on Dynamic Change of Soil Moisture Content in Growing Season in the Permafrost Regions of the Qinghai-Tibet Plateau

LI Yan-ping[1], SHI Li-jiang[2], XU Man-hou[1], LI Wen-gang[3]

(1. *College of Geography, Taiyuan Normal University, Jinzhong* 030619, *Shanxi, China*;

2. *College of Resources and Environment, Shanxi University of Finance and Economics, Taiyuan* 030006, *Shanxi, China*;

3. *Institute of Agricultural Resources and Economics, Shanxi Academy of Agricultural Sciences, Taiyuan* 030006, *Shanxi, China*)

Abstract: The typical alpine meadow vegetation types in the hinterland of the Qinghai-Tibet Plateau were taken as the research objects, the global warming was simulated by infrared lamp heating method, the values of soil moisture content at different depths of 0 - 100 cm in growing season (from May to September) 2012 were obtained by water probe, and its response to warming was analyzed. The results showed that: ① Short-term warming increased soil moisture content in alpine meadow, but the increase was not significant ($P > 0.05$), and the average increase was 2.85%; ② Soil moisture content decreased at first and then increased with the increase of soil depth, and decreased to the lowest value (13.8%) at the depth of 10 - 20 cm, and reached the highest value (20.57%) near the depth of 60 - 100 cm. Soil moisture content at 10 - 20 cm depth in the control group was significantly lower than that in other soil layers in five months, it at 0 - 20 cm depth in the warming group was significantly lower than that in other soil layers, which indicated that warming affected significantly the topsoil (0 - 10 cm deep) moisture content, but slightly the deep-soil moisture content, and the short-term warming had no effect on the vertical distribution of soil moisture content; ③ Soil moisture content was in an increase trend with the time from May to August, which indicated that the soil moisture content in growing season in Beilu River Basin in the Qinghai-Tibet Plateau increased gradually and to its highest value in August, and it began to decrease from September, but the decrease was not significant. The change trend of soil moisture content with the time in the warming group was basically the same as that in the control group.

Key words: soil moisture content; alpine meadow; simulated warming; growing season; permafrost; Qinghai-Tibet Plateau